

Kierunek: Informatyka Algorytmiczna (INA)

Specjalność: -

PRACA DYPLOMOWA
INŻYNIERSKA

**Implementacja programu GRAPHPLAN do
planowania akcji z wykorzystaniem
programowania ograniczeń**

Radosław Wojtczak

Opiekun pracy
dr Przemysław Kobyłański

Słowa kluczowe:

Planowanie

Grafy

Programowanie ograniczeń

Sztuczna inteligencja

Streszczenie

Obiektem badań poniższej pracy jest metodologia planowania o nazwie **"Graphplan"**, której esencją jest wykorzystanie własności grafów skierowanych w trakcie ustalania optymalnego planu transformacji stanu początkowego w stan końcowy w ustalonej przestrzeni przy wykorzystaniu wcześniej zdefiniowanych operatorów.

Dodatkowym aspektem pracy jest użycie programowania ograniczeń w celu zwiększenia wydajności jak i zmniejszenia przestrzeni poszukiwań przez algorytm w trakcie generowania planu.

Ów praca składa się z formalnego opisu przytoczonego algorytmu, przedstawienia przykładów zastosowania, implementacji, której wynikiem jest graf, przedstawiający optymalny plan wykonywanych operacji oraz zmian, jakie dzięki nim zachodzą w świecie, omówienie opcjonalnych rozszerzeń, które w zależności od sytuacji mogą wpłynąć na efektywność algorytmu oraz przeprowadzonych testów, których zadaniem jest wskazanie mocnych, jak i słabych stron przedmiotu badań.

Grafy są generowane przy pomocy programu, który opiera się o moduł **graphviz**, dostępny w języku programowania **python**.

Abstract

Tutaj treść streszczenia po angielsku.

Spis treści

Spis rysunków	III
Spis tabel	IV
Wstęp	1
1 Wprowadzenie	2
1.1 Planowanie	2
1.2 Planowanie przy użyciu komputerów	4
1.2.1 STRIPS	4
1.2.2 ADL i PDDL	5
1.2.3 Nowoczesne rozwiązania	5
2 GRAPHPLAN	6
2.1 Wprowadzenie	6
2.2 Warunki początkowe	6
2.3 Akcje	7
2.3.1 Typy akcji	8
2.4 Definiowanie świata	8
2.5 Warstwy grafu	8
2.6 Wzajemne wykluczanie	8
2.7 Równoległość	8
2.8 Wyszukiwanie planu	8
2.9 Prosty przykład	8
3 Programowanie ograniczeń	9
3.1 Wprowadzenie	9
3.2 Wykorzystanie w programowaniu w logice	9
3.3 Obrazowe przykłady	9
4 Implementacja	10
4.1 Połączenia między komponentami	10
4.2 Implementacja algorytmu	10
4.3 Generowanie grafów	10
4.4 Interfejs użytkownika	10
5 Instalacja i wdrożenie	11
5.1 Instalacja pakietu SWI-Prolog	11
5.2 Instalacja języka Python	11
5.3 Sposób uruchomienia programu	11
6 Testy	12
6.1 15	13
6.1.1 Wprowadzenie	13
6.1.2 Przykład	13

6.1.3	Szczegóły implementacyjne	13
6.1.4	Wyniki	13
6.1.5	Wnioski	13
6.2	CargoBot	13
6.2.1	Wprowadzenie	13
6.2.2	Przykład	13
6.2.3	Szczegóły implementacyjne	13
6.2.4	Wyniki	13
6.2.5	Wnioski	13
6.3	Przemieszczanie w przestrzeni	13
6.3.1	Wprowadzenie	13
6.3.2	Przykład	13
6.3.3	Szczegóły implementacyjne	13
6.3.4	Wyniki	13
6.3.5	Wnioski	13
6.4	Wieża Hanoi	13
6.4.1	Wprowadzenie	13
6.4.2	Przykład	13
6.4.3	Szczegóły implementacyjne	13
6.4.4	Wyniki	13
6.4.5	Wnioski	13
6.5	Lis, Gęś i Ziarno	13
6.5.1	Wprowadzenie	13
6.5.2	Przykład	13
6.5.3	Szczegóły implementacyjne	13
6.5.4	Wyniki	13
6.5.5	Wnioski	13
6.6	Problem komiwojażera	13
6.6.1	Wprowadzenie	13
6.6.2	Przykład	13
6.6.3	Szczegóły implementacyjne	13
6.6.4	Wyniki	13
6.6.5	Wnioski	13
6.7	Osiem Hetmanów	13
6.7.1	Wprowadzenie	13
6.7.2	Przykład	13
6.7.3	Szczegóły implementacyjne	13
6.7.4	Wyniki	13
6.7.5	Wnioski	13
Podsumowanie		14
Bibliografia		15
A Zawartość płyty CD		16

Spis rysunków

1.1	Przeniesienie klocka z jednej półki na drugą jako przykład sytuacji dla której istnieje możliwość utworzenia planu. Po lewej stronie od strzałki znajduje się stan początkowy, natomiast po prawej- oczekiwany cel. Naturalną akcją w przedstawionym świecie jest akcja <i>przenieś</i> , która zadany klocek przenosi z jednej półki na drugą.	3
1.2	Problem komiwojażera (Travelling Salesman Problem, TSP). Na rysunku pomocniczym liczby symbolizują wagi krawędzi. Węzeł oznaczony kolorem czerwonym odpowiada węzłowi startowemu, do którego należy wrócić. Długości krawędzi nie zachowują wskazanych przez wagi proporcji.	3
2.1	Najogólniejsza forma grafu planującego. Składa się on z węzłów, zwanych stanami oraz krawędzi zwanych akcjami. Docelowo poszczególne stany oraz akcje są parami różne, jednak mogą zajść sytuacje, gdy powtórzenie któregoś z komponentów będzie wymagane do uzyskania odpowiedniego celu.	6
2.2	Przykładowy moment startowy przyszłego planu. Za pomocą okręgów oznaczono roboty, natomiast poprzez kwadraty oznaczone są kafelki- miejsca, po których mogą poruszać się roboty.	7
2.3	Obrazowe przedstawienie ruchu robota B z kafelka 3 na kafelek 2	8

Spis tabel

Wstęp

Celem pracy jest zaimplementowanie algorytmu do planowania akcji o nazwie **GRAPHPLAN**, który po raz pierwszy został sformalizowany i opisany w pracy pod tytułem **"Fast Planning Through Planning Graph Analysis"**[1] przez Panów: Avrima L. Blum'a i Merricka L. Furst'a. Praca składa się z szczęściu rozdziałów.

W rozdziale pierwszym poruszono aspekty historyczne odnośnie planowania akcji przy użyciu komputerów oraz jaką rolę pełni w niej GRAPHPLAN, dokonano teoretycznego porównania algorytmu względem nowoczesnych metod z przytoczonej dziedziny informatyki.

W rozdziale drugim poddano dogłębną analizę implementowany algorytm- dokładnie opisano jego strukturę, warstwy, z których się składa oraz własności, które wyróżniają go na tle innych rozwiązań problemów związanych z planowaniem. W celu łatwiejszego przyswojenia mechanizmów stojących za GRAPHPLAN'em w trakcie opisu wprowadzono liczne proste przykłady wraz z grafikami wygenerowanymi przy pomocy narzędzi stworzonych na potrzeby ów pracy.

W rozdziale trzecim rozwinęto pojęcie programowania ograniczeń, wprowadzając formalną definicję, podstawowe słownictwo niezbędne do zrozumienia idei stojącej za tym sposobem programowania, omówiono benefity płynące z wykorzystania tego podejścia oraz przedstawiono obrazowo schemat funkcjonowania na podstawie prostych przykładów.

Rozdział czwarty skupia się na szczegółach implementacyjnych: wybranych językach programowania oraz technologiach wykorzystywanych również w warstwach graficznych programu. Dokonano szczegółowego opisu interfejsu użytkownika oraz jego możliwości, połączeń między komponentami oraz ważniejszych funkcji stanowiących trzon pracy.

Rozdział piąty przedstawia sposób instalacji oraz instrukcję obsługi programu, dodatkowo zawiera instrukcję odnośnie instalowania wszystkich niezbędnych komponentów wykorzystywanych w pracy, w których skład wchodzi interpretery jak i kompilatory używanych języków programowania oraz wszystkie biblioteki i moduły.

Rozdział szósty przedstawia przeprowadzone testy, które badają możliwości algorytmu w wcześniej spreparowanych środowiskach. W tej części została przeprowadzona analiza wydajnościowa algorytmu, weryfikacja wygenerowanych planów pod względem poprawności oraz porównanie otrzymanych wyników z innymi powszechnie wykorzystywanymi metodami planowania. Każdy z testów zawiera w sobie wniosek, w którym odbywa się zbiorcza ocena wszystkich wyżej wymienionych aspektów.

Końcowy rozdział stanowi zbiorcze podsumowanie pracy z komentarzem odnośnie potencjalnych rejonów, w których algorytm mógłby znaleźć swoje zastosowanie.

Rozdział 1

Wprowadzenie

1.1 Planowanie

Codziennie ludzie używają słowa "plan" w różnych kontekstach: firma planuje rozkład palet na magazynie, trener planuje strategię na najbliższy mecz, student planuje jak rozwiązać zadanie na kolokwium, czy chociażby człowiek codziennie planuje listę zakupów.

Mimo różnych kontekstów istnieją wyodrębnione wspólne cechy każdego z planów:

Definicja 1.1 *Warunki początkowe* - stan świata przed zastosowaniem akcji. W dalszej części pracy również określane jako **stany początkowe**.

- Każdy plan musi mieć jasno zadeklarowane warunki początkowe. Dzięki dokładnej wiedzy o świecie możliwym jest poprawne określenie akcji, przy pomocy których wprowadzane są modyfikacje obecnego stanu aż do otrzymania zadowalających rezultatów. Dla przykładu, firma musi wiedzieć ile oraz jakie palety przybędą na magazyn zanim rozpocznie planowanie rozkładu dostawy na magazynie.

Definicja 1.2 *Akcja* - działanie zmieniające przedstawiony świat w ściśle określony sposób. W dalszej części pracy również określana jako **operator**.

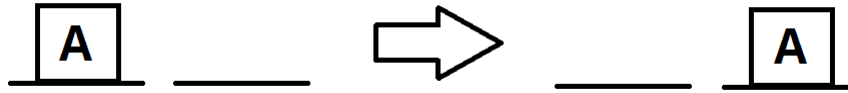
- Akcje pozwalają na modyfikację przedstawionego świata. Każda z akcji składa się z podmiotu, na który działa oraz czynności, która jest względem wskazanego podmiotu wykonywana. Przykładem dobrze określonej akcji może być przeniesienie klocka z jednego stolika na drugi - składa się ona z podmiotu w postaci klocka, oraz czynności w postaci przenoszenia, które możemy traktować jako ruch. Czynności mogą różnić się od siebie w kwestii skomplikowania, najważniejszym jest, aby były określone poprawnie i aby były wykonalne w zdefiniowanym świecie.

Definicja 1.3 *Cel* - Oczekiwany stan świata.

- Kwintesencją każdego planu jest cel, który należy uzyskać. Zwyczajowo plany składają się z celów możliwych do osiągnięcia ze stanu początkowego przy pomocy zdefiniowanej operacji, jednakże trzeba wziąć pod uwagę sytuację, w której niemożliwym jest uzyskanie wskazanego celu, szczególnie próbując automatyzować pojęcie planowania.

Przy pomocy powyższych definicji możliwym jest sformalizowanie pojęcia stojącego za słowem **plan**.

Definicja 1.4 *Plan* - lista akcji, której zastosowanie do stanu początkowego powoduje jego zmianę do stanu określonego w ramach celu.



Rysunek 1.1: Przeniesienie klocka z jednej półki na drugą jako przykład sytuacji dla której istnieje możliwość utworzenia planu. Po lewej stronie od strzałki znajduje się stan początkowy, natomiast po prawej – oczekiwany cel. Naturalną akcją w przedstawionym świecie jest akcja *przenieś*, która zadany klocek przenosi z jednej półki na drugą.

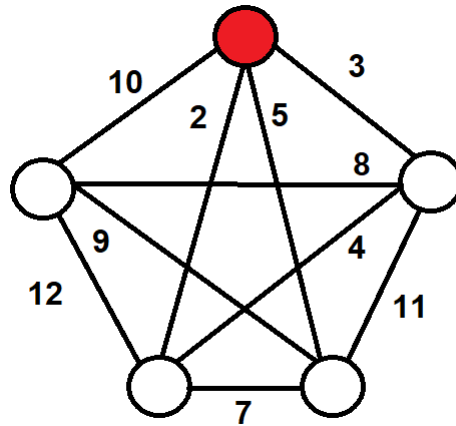
Łatwo zauważyć na podstawie przykładu 1.1, iż można utworzyć wiele planów, które dla zadanego stanu początkowego osiągają wskazany cel. Dla powyżej sytuacji naturalnym planem jest przeniesienie klocka A z platformy po lewej na platformę po prawej, lecz nie jest to jedyna możliwość. Również satysfakcjonującym planem zgodnie z wprowadzoną wyżej definicją byłaby następująca sekwencja akcji:

1. Przenieś klocek A z lewej platformy na prawą
2. Przenieś klocek A z prawej platformy na lewą
3. Przenieś klocek A z lewej platformy na prawą

Generowanie rekurencyjnie nieskończonych planów poprzez bezużyteczne przestawienia ”w miejscu”, mimo tego, iż zawiera się w definicji 1.4, nie jest oczekiwanym efektem. Proces planowania odbywa się po to, by wykonać transformację świata przy jak najmniejszym nakładzie sił w jak najkrótszym czasie. Z tego względu wprowadzono pojęcie **planu optymalnego**.

Definicja 1.5 Plan optymalny- Plan o minimalnej liczbie kroków satysfakcjonujący wskazany cel.

W dalszej części pracy słowo **plan** najczęściej będzie utożsamiane z planem optymalnym. Wprowadzenie powyższej definicji wiąże się z powstaniem bardzo ważnego pytania: *Jak utworzyć plan optymalny?* Bazując na przykładach takich jak 1.1 złudną może być myśl, iż generowanie optymalnych planów jest rzeczą prostą. Niech kolejny przykład będzie tego dowodem.



Rysunek 1.2: Problem komiwojażera (Travelling Salesman Problem, TSP). Na rysunku pomocniczym liczby symbolizują wagi krawędzi. Węzeł oznaczony kolorem czerwonym odpowiada węzłowi startowemu, do którego należy wrócić. Długości krawędzi nie zachowują wskazanych przez wagi proporcji.

Problem komiwojażera jest popularnym zagadnieniem optymalizacyjnym, którego istotą jest wskazanie ścieżki o najmniejszej sumie wag krawędzi, która przechodzi dokładnie jeden raz przez każdy wierzchołek i wraca do wierzchołka startowego. Często problem wędrującego komiwojażera przedstawiany jest przy pomocy kuriera oraz domów, które musi odwiedzić (za wierzchołek startowy uważa się magazyn, w którym kurier rozpoczyna swoją pracę). Mimo faktu, iż w przykładzie 1.2 występuje jedynie 5 miejsc, w

których musi zatrzymać się kurier, utworzenie optymalnego planu dla przedstawionej sytuacji jest nielada wyzwaniem. Z tego powodu ludzie postanowili skorzystać z potężnych mocy obliczeniowych komputerów przy generowaniu bardziej skomplikowanych planów.

1.2 Planowanie przy użyciu komputerów

1.2.1 STRIPS

W 1971 roku Panowie: Richard Fikes oraz Nils Nilsson z Stanford Research Institute (SRI International, jeden z najsłynniejszych na świecie ośrodków badawczych) zdecydowali się na przedstawienie światu nowego podejścia w dziedzinie planowania o nazwie **STRIPS** (**ST**anford **R**esearch **I**nstitute **P**roblem **S**olver)[2]. **STRIPS** rozwiązuje wskazany problem poprzez przeszukiwanie wszystkich stanów świata, aż do momentu gdy znajdzie taki, w którym wskazane cele są spełnione. Ważnym założeniem programu jest istnienie ciągu akcji, który gwarantuje otrzymanie celu. Zadanie to jest realizowane poprzez znalezienie sekwencji operatorów, która konwertuje wymodelowany stan początkowy, w model, w którym wszystkie zdefiniowane cele są spełnione. Definicje operatorów, stanu początkowego oraz celu są niemalże identyczne jak 1.1, 1.2 i 1.3, z tym, że definicja Akcji została w naturalny sposób rozwinięta o ciąg przyczynowo-skutkowy. Zauważono, iż w skład każdej akcji poza samą czynnością wchodzi dwie składowe, nazywane środowiskowymi- warunki zajścia oraz efekty zajścia.

Definicja 1.6 *Warunkiem- zajścia akcji jest istnienie odpowiedniej konfiguracji świata, dzięki której akcja może zostać wykonana.*

Definicja 1.7 *Efektem- zajścia akcji są zmiany, które zaszły w przedstawionym świecie ze względu na jej wykonanie.*

Mówiąc kolokwialnie, każda akcja ma swoją przyczynę oraz swój skutek. **Przyczyną** akcji w przykładzie 1.1 jest znajdowanie się klocka na lewej platformie. Gdyby klocek A znajdował się na prawej platformie, wykonanie akcji przesunięcia klocka z platformy lewej na prawą nie mogłoby zostać wykonane, natomiast **efektem** akcji jest przeniesienie klocka na prawą platformę. Łatwo zauważyć, iż brak innych obiektów na platformie prawej jest niezbędny, aby klocek mógł zostać tam przeniesiony. Kolejną naturalną obserwacją jest stwierdzenie, iż przeprowadzenie akcji dodaje nam nowe informacje o świecie w dwóch kontekstach:

- Dodającym- pojawienie się lub podtrzymanie danej składowej świata
- Usuwającym- pozbawienie świata danej składowej

Po wykonaniu czynności z przykładu 1.1 wyróżniamy trzy typy nowych informacji:

- Warunek dodający- Obecność klocka na lewej platformie, prawa platforma jest pusta
- Efekt dodający- Obecność klocka na prawej platformie
- Efekt usuwający - Platforma lewa jest pusta

W rozważanym podejściu każda z czynności zdefiniowana jest przy pomocy wyżej wskazanych trzech składowych.

Takie zdefiniowane świata okazuje się wystarczające do rozwiązywania problemów pokroju rearanżacji obiektów czy nawigowania w ściśle zdefiniowanej przestrzeni, czego najlepszym przykładem jest pierwszy robot- **Shakey**. Shakey był pierwszym robotem, który dzięki zainstalowanemu oprogramowaniu, posiadał umiejętność analizy własnego otoczenia. Dzięki zaimplementowanemu podejściu STRIPS (oczywiście z odpowiednimi dostosowaniami do sytuacji) był w stanie rozwiązywać problemy z zakresu wyznaczania drogi, czy planowania rozmieszczenia obiektów w pokojach. Shakey, ze względu na swoją innowacyjność i przełomowość często jest nazywany archetypem dzisiejszych autonomicznych samochodów czy militarnych dronów.

Dzięki swojej roli w rozwoju planowania z użyciem komputerów, STRIPS został dodatkowo wyróżniony- od jego nazwy pochodzi języki opisu świata korzystający z trójki: stan początkowy, akcja oraz cel. Przez następne lata rozwiązania w obszarze planowania silnie bazowały na wprowadzonym w powyższej pracy opisie świata.



1.2.2 ADL i PDDL

TO-DO

1.2.3 Nowoczesne rozwiązania

TO-DO

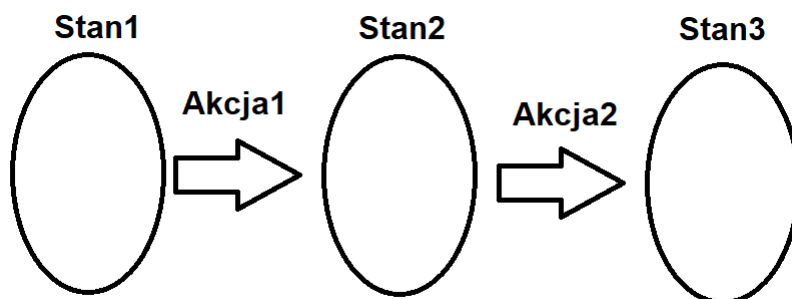
Pomiędzy powstaniem ulepszeń metodologii STRIPS w postaci ADL oraz PDDL powstały również inne podejścia, w tym silnie bazujący na grafach i ich możliwościach algorytm o wdzięcznej nazwie **GRAPHPLAN**

Rozdział 2

GRAPHPLAN

2.1 Wprowadzenie

GRAPHPLAN jest algorytmem do planowania akcji działający w dziedzinie zdefiniowanej przez język STRIPS, dodatkowo bazuje na paradygmacie, który autorzy algorytmu określają jako "graf planujący"[1].



Rysunek 2.1: Najogólniejsza forma grafu planującego. Składa się on z węzłów, zwanych stanami oraz krawędzi zwanych akcjami. Docelowo poszczególne stany oraz akcje są parami różne, jednak mogą zająć sytuacje, gdy powtórzenie któregoś z komponentów będzie wymagane do uzyskania odpowiedniego celu.

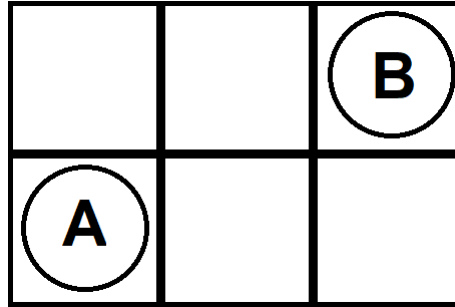
Pierwotną ideę planu grafującego przedstawiono na obrazku 2.1. W trakcie dalszego omawiania metodologii GRAPHPLAN powyższa rycina będzie pojawiała się ponownie z coraz to większym poziomem szczegółowości. Ze względu na fakt, iż Graphplan opiera się na języku STRIPS musi mieć jasno zdefiniowane: stan początkowy, akcje oraz cel, który pragniemy uzyskać. Dzięki swojej strukturze Graphplan w swojej naturze podobny jest do programowania dynamicznego.

2.2 Warunki początkowe

GRAPHPLAN, w odróżnieniu od człowieka, musi być w posiadaniu całej wiedzy o świecie, aby móc rozpocząć działanie. Przez całą wiedzę o świecie rozumie się posiadanie informacji na temat każdego obiektu oraz jego stanu. Przed dalszą częścią pracy należy dokonać pewnego wyróżnienia. Słowo **stan** pojawia się w dwóch znaczeniach: stan jako pojedyncza informacja o obiekcie w świecie (Przykład: klocek B na stole numer 3) oraz stan, jako zbiór wszystkich takich informacji w danym momencie czasu. Z tego względu wprowadzono nowe pojęcie- "Poziom stanów", które należy stosować jako oznaczenie wszystkich informacji o świecie w danym momencie.

Definicja 2.1 Poziom stanów - Zbiór informacji o stanach wszystkich obiektów w świecie w danej jednostce czasu t

Szczególnym poziomem stanów jest poziom oznaczany jako pierwszy i nazywany **Warunkami początkowymi**, którego poprawne zdefiniowanie jest kluczowym aspektem w kontekście uzyskania poprawnego wyniku przez algorytm. Analizując ponownie przykład 1.1 mylnym jest myśleć, iż jedyną informacją, jaką algorytm powinien posiadać o świecie jest pobyt klocka A na lewej platformie. Również istotną informacją jest brak klocka na platformie prawej, czyli informacja, że jest on *pusty*. Mimo poczucia nadmiarowości tej informacji, w dalszej części pracy wyjaśni się, dlaczego ta informacja jest niezbędna do uzyskania poprawnego wyniku. Przykład świata przedstawionego oraz skonstruowanego dla niego stanu początkowego:



Rysunek 2.2: Przykładowy moment startowy przyszłego planu. Za pomocą okręgów oznaczono roboty, natomiast poprzez kwadraty oznaczone są kafelki- miejsca, po których mogą poruszać się roboty.

Na powyższym przykładzie, zgodnie z powyższą ideą wyszczególniamy 6 stanów początkowych. Dodatkowo należy doprecyzować pojęcie bycia robota na danym kafelku. Wykonano to przy pomocy dwuarumentowej relacji *na*, która jako pierwszy argument przyjmuje syngaturę robota, a na drugim- numer kafelka. Na potrzeby przykładu ustalono, iż numerowanie odbywa się rzędami od prawej do lewej. Zgodnie z tymi ustaleniami pozycję robotów A i B możemy określić w następujący sposób: *na(A,4)* oraz *na(B,3)*. Również pustość kafelków należy sformalizować wprowadzając relację jednoargumentową o nazwie *pusty*, która przyjmuje jako argument numer pustego kafelka. Reasumując, zbiorem stanów początkowy dla analizowanego przykładu 2.2 jest:

$$\{pusty(1),pusty(2),na(B,3),na(A,4),pusty(5),pusty(6)\} \quad (2.1)$$

2.3 Akcje

Posiadając dobrze określony stan początkowy następnym krokiem jest zabranie się za zdefiniowanie akcji. Zgodnie z 1.2 oraz wzmiance o akcjach w planerze STRIPS, akcja musi składać się z trzech komponentów:

- Czynności
- Warunków zajścia
- Efektów zajścia

Z tego powodu każdą z akcji będziemy traktować jako trójkę

$$A = (C,W,E) \quad (2.2)$$

gdzie każda z liter odpowiada pierwszej literze wyżej wymienionego pojęcia. W skład efektów wchodzi dwa pojęcia wprost z terminologii STRIPS- dodające i usuwające. Dzięki takiemu podziałowi łatwiejszym będzie zachowanie silnego podziału między przyczynami a efektami akcji. Jedyną czynnością, którą należy brać pod uwagę w ramach 2.2 jest czynność *ruch*, którą definiujemy jako trzyargumentową relację:

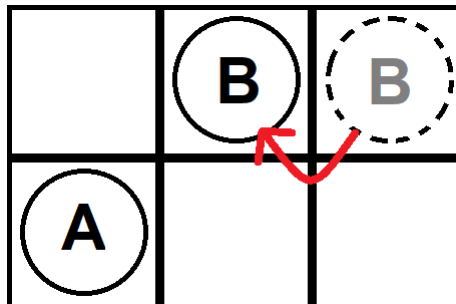
$$ruch(R,S,D) \quad (2.3)$$

, gdzie R odpowiada robotowi, który musi się przemieścić z kafelka oznaczonego literą S (kafelki startowy) na kafelek oznaczony literą D (kafelki docelowy).

Drugą składową czynności są *Warunki*. Warunki definiujemy jako następującą parę:

$$W = (D, U) \quad (2.4)$$

gdzie D oznacza warunki dodające, a U- warunki usuwające.



Rysunek 2.3: Obrazowe przedstawienie ruchu robota B z kafelka 3 na kafelek 2

Niech rozpatrywaną akcją będzie przemieszczenie robota B z pozycji 3 na pozycję 2, przedstawiona na 2.3. Biorąc pod uwagę, iż stanem początkowym jest 2.1 Warunkami zajścia zdarzenia będą: $na(R, S)$ oraz $pusty(D)$. Dla efektów natomiast sytuacja wygląda następująco: efektami dodającymi są $na(R, D)$ oraz $pusty(S)$, które informują o tym, iż klocek zmienił swoje położenie, a efektami usuwającymi $na(R, S)$ oraz $pusty(D)$, które informują o tym, iż kafelek został zwolniony.

Posiadając następującą wiedzę poniżej zdefiniowano jedyną akcję znajdującą się w prezentowanym przykładzie:

$$A = (ruch(R, S, D), na(R, S), pusty(D), na(R, D), pusty(S), na(R, S), pusty(D)) \quad (2.5)$$

Podstawiając za $R = B$, $S = 3$, a $D = 2$ otrzymujemy następującą akcję:

$$A = (ruch(B, 3, 2), na(B, 3), pusty(2), na(B, 2), pusty(3), na(B, 3), pusty(2))$$

Analogicznie można zdefiniować ruch na kafelek numer 6, oraz dwa ruchy dla robota o sygnaturze A.

2.3.1 Typy akcji

TO-DO: Akcje aktywne i pasywne

2.4 Definiowanie świata

2.5 Warstwy grafu

2.6 Wzajemne wykluczanie

2.7 Równoległość

2.8 Wyszukiwanie planu

2.9 Prosty przykład

Rozdział 3

Programowanie ograniczeń

3.1 Wprowadzenie

3.2 Wykorzystanie w programowaniu w logice

3.3 Obrazowe przykłady

Rozdział 4

Implementacja

4.1 Połączenia między komponentami

4.2 Implementacja algorytmu

4.3 Generowanie grafów

4.4 Interfejs użytkownika

Rozdział 5

Instalacja i wdrożenie

5.1 Instalacja pakietu SWI-Prolog

5.2 Instalacja języka Python

5.3 Sposób uruchomienia programu

Rozdział 6

Testy

6.1 15

6.1.1 Wprowadzenie

6.1.2 Przykład

6.1.3 Szczegóły implementacyjne

6.1.4 Wyniki

6.1.5 Wnioski

6.2 CargoBot

6.2.1 Wprowadzenie

6.2.2 Przykład

6.2.3 Szczegóły implementacyjne

6.2.4 Wyniki

6.2.5 Wnioski

6.3 Przemieszczanie w przestrzeni

6.3.1 Wprowadzenie

6.3.2 Przykład

6.3.3 Szczegóły implementacyjne

6.3.4 Wyniki

6.3.5 Wnioski

6.4 Wieża Hanoi

6.4.1 Wprowadzenie

6.4.2 Przykład

6.4.3 Szczegóły implementacyjne

6.4.4 Wyniki

6.4.5 Wnioski

Podsumowanie

W podsumowaniu należy określić stan zakończonych prac projektowych i implementacyjnych. Zaznaczyć, które z zakładanych funkcjonalności systemu udało się zrealizować. Omówić aspekty pielęgnacji systemu w środowisku wdrożeniowym. Wskazać dalsze możliwe kierunki rozwoju systemu, np. dodawanie nowych komponentów realizujących nowe funkcje.

W podsumowaniu należy podkreślić nowatorskie rozwiązania zastosowane w projekcie i implementacji (niebanalne algorytmy, nowe technologie, itp.).

Bibliografia

- [1] Fast planning through planning graph analysis. Web pages: <https://www.cs.cmu.edu/~avrim/Papers/graphplan.pdf> [ostatni dostęp: 21.10.2022].
- [2] Strips: A new approach to the application of theorem proving to problem solving. Web pages: <http://ai.stanford.edu/~nilsson/OnlinePubs-Nils/PublishedPapers/strips.pdf> [ostatni dostęp: 07.11.2022].

Załącznik A

Zawartość płyty CD

W tym rozdziale należy krótko omówić zawartość dołączonej płyty CD.